

*Ф.И. Абрамчук, д-р техн. наук, В.М. Манойло, канд. техн. наук,  
А.Н. Кабанов, канд. техн. наук, М.С. Липинский, асп.*

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ

### Введение

Рост мировых цен на топлива нефтяного происхождения (бензин, дизельное топливо) для авто-тракторных двигателей, а также ужесточение требований к уровню токсичности отработавших газов (ОГ) ставят перед двигателестроителями задачи снижения затрат на топливо и уменьшения содержания токсичных компонентов в ОГ.

Одним из эффективных способов решения этих задач является конвертация (переоборудование) дизелей в газовые ДВС.

Специалистами отечественного и мирового двигателестроения ведутся работы по конвертированию дизельных двигателей в ДВС с искровым зажиганием, использующие в качестве топлива сжатый природный газ (СПГ).

Многочисленные экспериментальные исследования газового двигателя показали преимущества этого типа ДВС перед дизельными, в частности – по токсичности ОГ [1]. Однако наряду с этим отмечается некоторое снижение эффективной мощности (в пределах 10 – 20%) и значительный рост тепловых нагрузок на детали камеры сгорания [2, 3].

Работа на бедных смесях [4], применяемая в газовых двигателях, кроме существенного улучшения показателей токсичности позволяет частично снизить теплонапряженность деталей камеры сгорания и приводит к снижению мощности.

Для компенсации совокупной потери мощности в газовом ДВС необходимо оснастить его системой газотурбинного наддува (ГТН), особенно при работе на бедных смесях и переводе на СПГ.

### Анализ публикаций

В настоящее время в публикациях приводится множество информации, касающейся конвертации дизельных ДВС в газовые двигатели с искровым зажиганием.

Так, в России проведены работы [1, 5, 6] по созданию газовых ДВС на базе двигателей КамАЗ, ЯМЗ и др.

В работе [1] рассмотрены возможности создания газового двигателя, у которого рабочий процесс протекает при коэффициенте избытка воздуха

( $\alpha$ ), равном 1–1,6. Отмечены основные достоинства и недостатки того или иного рабочего процесса ДВС. Уделено внимание теплонапряженности деталей двигателя при работе с  $\alpha > 1$ . Рассмотрены и предложены рациональные схемы ГТН. Приведены некоторые результаты испытаний газового двигателя КамАЗ, однако данные сведения не могут быть в полной мере применимы к двигателю 6ГЧ 13/14 вследствие конструктивных его особенностей.

В материалах статьи [5] приведены основные причины снижения технико-экономических показателей ДВС при конвертации дизеля для работы на СПГ. Затронуты вопросы надежности газовых двигателей, конвертируемых из дизелей. Уделено внимание влиянию величины  $\alpha$  на технико-экономические и экологические показатели двигателя. В данной статье обоснована необходимость применения концепции бедного горения для газовых ДВС.

Работа [6] содержит информацию о практической реализации идеи газового ДВС на базе дизельного двигателя КамАЗ. Здесь приведены основные технические характеристики полученного газового двигателя. В этой статье описаны подходы к конструированию газовых ДВС с ГТН.

В работе [7] приведено описание газового двигателя, спроектированного на базе дизеля ЯМЗ-236, с системой ГТН и распределенной подачей газа.

Достаточно большое внимание развитию газовых ДВС уделяется и в Украине. Так, специалистами Института проблем машиностроения НАН Украины им. А.Н. Подгорного [8] проведена конвертация дизельного двигателя Д-21А в газовый двигатель с искровым зажиганием. В данной статье представлены результаты испытаний для безнаддувного варианта этого двигателя.

Подобные работы по конвертации дизельных ДВС (в частности Д-240) в газовые двигатели с искровым зажиганием проводятся также в Луцком национальном техническом университете. В статье [9] приведены некоторые результаты испытаний безнаддувного варианта двигателя.

В Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете проводятся исследования по конвертированию двигателя ЯМЗ-236 в газовый двигатель с искровым зажиганием. В лаборатории газовых двигателей создан стенд для испытаний двигателя 6ГЧ 13/14 при работе на сжатом природном газе [10]. Получены результаты исследования рабочего процесса и теплонапряженности деталей камеры сгорания.

В работах [2, 4] содержится информация о теплонапряженности головки цилиндров дизельных и газовых двигателей ЯМЗ и способов ее снижения. Пробные стендовые испытания [2] безнаддувного варианта газового ДВС 6ГЧ 13/14 на режимах максимального крутящего момента показали, что средняя температура головки цилиндров, в районе свечного узла, составляет 430 – 440°C, что превышает допустимые температуры. Длительные моторные испытания, приведенные в работе [4] на дизелях семейства СМД, показали, что рациональная температура в межперемычном пространстве клапанов должна изменяться в диапазоне 330 – 365°C. При таких температурах у дизельных ДВС семейства СМД, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях, на протяжении двух лет не наблюдалось ни одного случая появления трещин в межперемычном пространстве клапанов головки цилиндров.

Исходя из анализа литературных источников, становится очевидным, что при конвертации дизелей в газовые двигатели с искровым зажиганием наблюдается падение эффективной мощности и увеличение тепловых нагрузок на детали камеры сгорания.

Так по предварительным расчетам эффективная мощность газового двигателя 6ГЧ 13/14 при  $\alpha = 1,3$  составляет 99,07 кВт, что на 23,84 % меньше в сравнении с дизельным вариантом. Дальнейшее увеличение  $\alpha$  до 1,6 приводит к снижению мощности до 80,5 кВт на номинальном режиме работы, что на 38,07 % меньше по сравнению с базовым вариантом. Поэтому наиболее эффективным способом повышения мощности и снижения тепловых нагрузок на детали камеры сгорания (при осуществлении концепции двигателя, работающего на бедных смесях) является применение ГТН.

Таким образом, основной целью данной работы является обоснование наиболее технологичной схемы ГТН для двигателя 6ГЧ 13/14 и рациональ-

ный выбор турбокомпрессора для такого типа и размерности ДВС.

#### Обоснование выбора схемы ГТН для двигателя 6ГЧ 13/14

В работах [1, 11] предлагаются выборочные варианты схем ГТН газовых двигателей с искровым зажиганием. Авторами предлагаются свои варианты систем ГТН газовых ДВС. Наиболее эффективные схемы систем ГТН ДВС представлены в работе [1] и предлагаемые авторами, приведены на рис. 1.

На рис. 1а приведена схема газового двигателя с наддувом от 2-х турбокомпрессоров и разделенной системой подачи воздуха по цилиндрам. Данная схема содержит в себе: 1 – цилиндры газового двигателя; 2, 3 – выпускные и впускные коллекторы; 4 – дроссельные узлы левого и правого рядов цилиндров; 5, 6 – турбокомпрессоры левого и правого рядов цилиндров; 7 – воздушный фильтр. Применение данной схемы наддува предназначено для получения соотношения  $P_s/P_T \geq 1$ . Такое соотношение  $P_s/P_T$  способствует благоприятному протеканию процесса газообмена и повышению мощностных показателей газового двигателя, где  $P_s$  – давление воздуха во впускном коллекторе, а  $P_T$  – давление ОГ в выпускном коллекторе перед турбиной.

Главным недостатком данной схемы ГТН, приведенной на рис. 1а, является её громоздкость. Применение двух отдельных турбокомпрессоров и дроссельных узлов приведет к увеличению стоимости газового двигателя с данной системой наддува.

Появится определенный ряд сложностей, связанных с адаптацией этих агрегатов наддува на двигателе. Однако данная схема наддува является наиболее предпочтительной с точки зрения обеспечения условия  $P_s/P_T \geq 1$ . Применение турбокомпрессоров типоразмера ТКР-5,5-С1, выпускаемых Харьковским агрегатным заводом, способствует развитию не только отечественного двигателестроения, но и удовлетворению требуемого условия  $P_s/P_T \geq 1$ .

На рис. 1б приведена схема газового двигателя с наддувом от 2-х турбокомпрессоров с совмещенной системой подачи воздуха. Данная схема предложена для опытного образца газового двигателя КамАЗ. Схема содержит в себе: 1 – 3 тоже, что и для схемы а); 4 – общий дроссельный узел для двух рядов цилиндров; 5, 6 – турбокомпрессоры левого и правого рядов цилиндров; 7 – воздуш-

ный фильтр. В качестве агрегатов наддува используются турбокомпрессоры К-27 производства Чехии. Применение данной схемы наддува позволило получить соотношение  $P_s/P_T > 1$ , что в свою очередь оказало благоприятное влияние на протекание процесса газообмена [1] и, таким образом, способствовало улучшению технико-экономических показателей двигателя. Использование этой схемы наддува дает запас крутящего момента в 20 % по внешней скоростной характеристике. Такая схема ГТН может быть применена и для двигателя 6ГЧ 13/14, в качестве агрегатов наддува могут устанавливаться турбокомпрессоры типоразмера ТКР-5,5-С1 производства Харьковского агрегатного завода.

На рис. 1в приведена схема газового двигателя с наддувом от одного турбокомпрессора. Данная схема состоит: 1 – 3 тоже, что и для схемы а); 4 – общий дроссельный узел для двух рядов цилиндров; 5 – общий турбокомпрессор для двух рядов цилиндров; 6 – воздушный фильтр. В опытных образцах газового двигателя КамАЗ применялась та-

кая схема ГТН, с ТКР-9 (Россия) и с ТКР Н1В ХОЛСТЕН (Англия). По оценкам специалистов [1] она не смогла обеспечить отношение  $P_s/P_T \geq 1$ , ввиду несовершенства системы подвода отработавших газов к турбине. Однако для двигателя 6ГЧ 13/14 данная схема является более предпочтительной, так как можно использовать штатную систему ГТН, в которой в качестве агрегата наддува применен серийно выпускаемый турбокомпрессор ТКР-9-12-07 для данной размерности двигателя. А для обеспечения условия  $P_s/P_T > 1$  необходимо использовать опыт доводки дизельного двигателя ВАЗ-341 с турбонаддувом [12]. При адаптации ТКР к двигателю специалистами ВАЗа в процессе экспериментальных исследований были испытаны различные типоразмеры проходных сечений улиток сопловых аппаратов турбины и диффузоров компрессора. Путем поэтапного рационального подбора узлов системы наддува была осуществлена адаптация ТКР к дизелю ВАЗ-341.

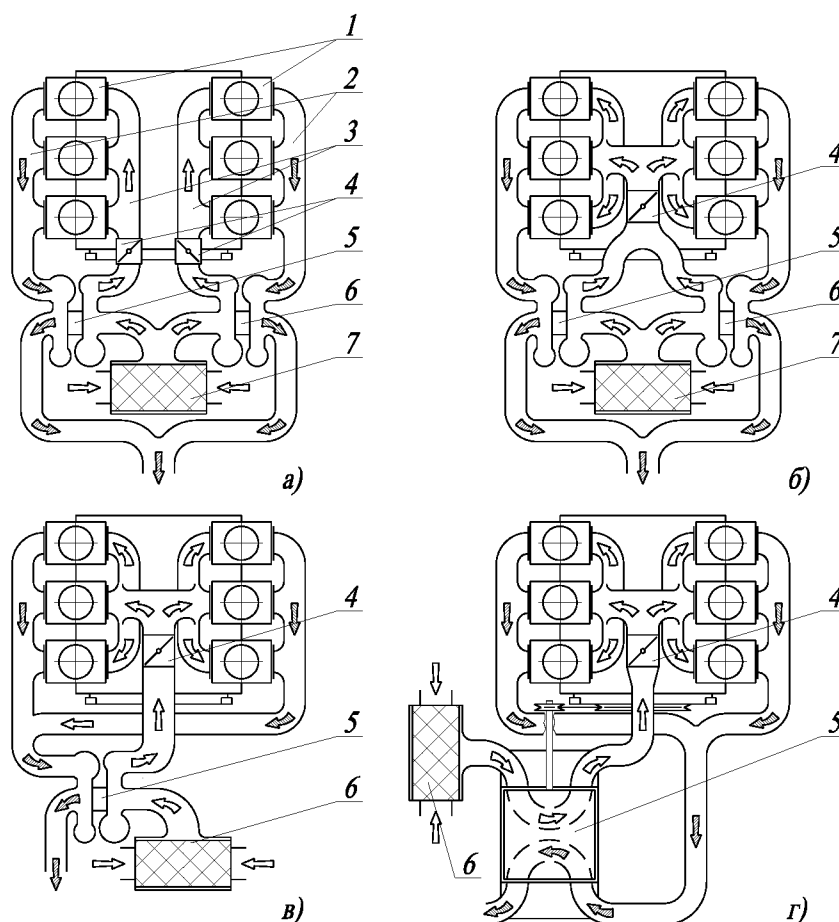


Рис. 1. Схемы систем ГТН газового двигателя

На рис. 1г представлена схема газового двигателя с наддувом от волнового обменника давления (ВОД). Эта схема наддува может применяться в качестве основной не только в чисто газовом двигателе, но и при работе ДВС на смеси СПГ с 10 % добавкой водорода. Привлекательность данной схемы заключается в том, что агрегат наддува может работать при более высоких температурах ОГ, чем турбокомпрессоры, развивая достаточные давления наддува, и при этом отсутствует провал нарастания мощности в процессе резкого открытия дроссельной заслонки [11].

Таким образом, для двигателя 6ГЧ 13/14 наиболее подходящими схемами ГТН являются: схема газового двигателя с наддувом от одного турбокомпрессора (см. рис. 1в), и схема газового двигателя с наддувом от ВОД (см. рис. 1г), как перспективные для дальнейшей модернизации двигателя 6ГЧ 13/14.

#### Обоснование выбора типоразмера турбокомпрессора

Выбор типоразмера турбокомпрессора сводится к определению расчетным методом основных параметров турбокомпрессора, а именно степени повышения давления  $\pi_k$  и расхода воздуха через компрессор  $G_k$ . Далее, используя ГОСТ 9658–81, по полученным значениям  $\pi_k$  и  $G_k$ , определяем необходимый типоразмер турбокомпрессора.

Исходными данными для осуществления расчета являются: число цилиндров двигателя, тактность двигателя, диаметр цилиндра, ход поршня, частота вращения коленчатого вала, коэффициент избытка воздуха, коэффициент наполнения, удельный эффективный расход топлива и требуемая мощность.

Используя характеристики подачи воздуха турбокомпрессорами, приведенные в ГОСТе 9658–81, наносим точки, соответствующие пересечению секундной подачи воздуха турбокомпрессора и степени повышения давления. Наносимые точки соответствуют расчетному режиму номинальной мощности ДВС. Таким образом, на характеристику подачи воздуха турбокомпрессора накладываем полученную расчетную точку 1. Фрагменты данного наложения расчетных точек на характеристику подачи воздуха турбокомпрессора представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что точка 1, соответствующая требуемым расходам подачи воздуха и степени повышения давления для схемы ГТН от одного

ТКР (см. рис. 1в), находится практически на границах характеристик подачи воздуха турбокомпрессоров ТКР–8,5 и ТКР–11.

На транспортные двигатели ЯМЗ–236Н серийно устанавливается турбокомпрессор ТКР-9-12-07.

ГОСТ 9658–81 не содержит расходной характеристики подачи воздуха турбокомпрессора ТКР-9-12-07, но если предположить, что данная характеристика располагается между характеристиками турбокомпрессоров ТКР-8,5 и ТКР-11, то серийно выпускаемый турбокомпрессор для двигателей ЯМЗ–236Н может обеспечить желаемые подачи воздуха и степень повышения давления, и тем самым позволит получить требуемое отношение давлений  $P_s/P_T > 1$ . Если отношение  $P_s/P_T > 1$  не будет достигнуто, то необходимо использовать рекомендации источника [12].

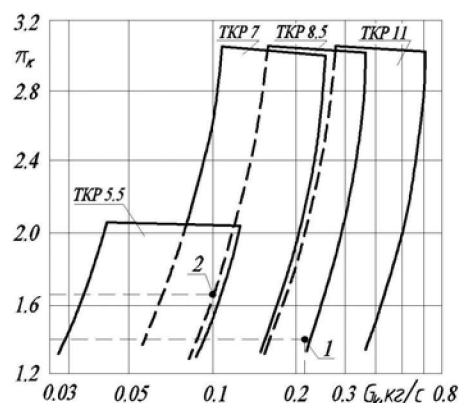


Рис. 2. Фрагмент характеристик турбокомпрессоров по ГОСТ 9658-81

На том же рис. 2, изображена точка 2, соответствующая требуемым значениям  $\pi_k$  и  $G_k$  для схемы газотурбинного наддува от двух турбокомпрессоров с общей системой подачи воздуха к цилиндрам двигателя (см. рис. 1б). Из данного рисунка видно, что применение двух турбокомпрессоров типоразмера 5,5 способно обеспечить двигатель 6ГЧ 13/14 требуемым количеством воздуха и удовлетворить предъявляемым требованиям по мощностным показателям.

Расчет характерных точек выполнен для режима, который соответствует номинальной мощности двигателя.

#### Выводы

1. При конвертации дизельных двигателей в газовые и реализации концепции «бедного горения» происходит не только улучшение экологиче-

ских показателей газового двигателя и снижение теплонапряженности деталей камеры сгорания, но и уменьшение мощности. Поэтому одним из наиболее эффективных средств компенсации утерянной мощности такого типа двигателей является оснащение последних газотурбинным наддувом.

2. Для газового двигателя 6ГЧ 13/14, работающего на бедных газовых смесях, выбрана схема газотурбинного наддува от одного турбокомпрессора (см. рис. 1в) ввиду возможности использования серийно выпускаемой системы ГТН и агрегата наддува.

3. В первом приближении подобран тип и марка турбокомпрессора. Окончательная адаптация ТКР к двигателю может быть осуществлена только экспериментальным путем.

#### Список литературы:

1. Луканин В.Н. Предварительные результаты газового двигателя с наддувом мощностью 200 кВт / В.Н. Луканин, А.С. Хачиян, В.Е. Кузнецов, И.Г. Шишов, Р.Х. Хамидуллин // Сборник научных трудов МАДИ (ТУ). – 2002. – С. 68 – 79.
2. Абрамчук Ф.И. Экспериментальная оценка теплового состояния элементов головки цилиндров газового двигателя 6Ч13/14 / Ф.И. Абрамчук, В.М. Манойло, В.С. Червяк, В.И. Рубцов, Ю.С. Богданов, С.В. Салдаев, А.Н. Кабанов, Г.В. Майстренко // Автомобильный транспорт. – 2008. – №23. – С. 120 – 124.
3. Чернышев Г.Д. Рабочий процесс и теплонапряженность автомобильных дизелей / Г.Д. Чернышев, А.С. Хачиян, В.И. Пикус. – М.: Машиностроение, 1986. – 216

- с. 4. Определение эффективности мероприятий по снижению температуры нижней плиты головки цилиндров двигателя СМД-17К/СМД-18К: Отчет НИИ/ГСКБД. – Технический отчет № 2683-73, – Харьков, 1973. – 11 с.
5. Хачиян А.С. Использование природного газа в качестве топлива для автомобильного транспорта / А.С. Хачиян // Двигателестроение. – 2002. – №2. – С. 8 – 9.
6. Гайворонский А.И. Перевод дизеля КамАЗ-740.13-260 на газовое топливо/А.И. Гайворонский, Г.С. Савельев//Грузовик &. – 2006. – №6. – С. 16 – 20.
7. Разработка газового двигателя на базе дизеля ЯМЗ – 236НЕ: (разработка отдела энергосберегающих технологий и альтернативных топлив) [Электронный ресурс]/В.Ф. Кутенев, В.А. Лукино//Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт – 2007. – Режим доступа к источнику: <http://www.nami.ru/subdivisions/engines/energy-efficient-technologies/development>.
8. Бганцев В.Н. Газовый двигатель на базе четырехтактного дизеля общего назначения / В.Н. Бганцев, А.М. Левтеров, В.П. Мараховский // Техно – plus. – 2003. – №10. – С. 74 – 75.
9. Захарчук В.І. Розрахунково-експериментальні дослідження газового двигуна, переобладнаного з дизеля / В.І. Захарчук, О.П. Сітовський, І.С. Козачук // Автомобільний транспорт. – 2005. – №16. – С. 276 – 278.
10. Богомолов В.А. Экспериментальная установка для доводки систем зажигания и управления газовым двигателем с искровым зажиганием 6Ч13/14 / В.А. Богомолов, Ф.И. Абрамчук, В.М. Манойло, А.Н. Кабанов, С.В. Салдаев // Авто Газо Заправочный комплекс + Альтернативное топливо. – 2005. – №4 (22). – С. 42–45.
11. Манойло В.М. Улучшение характеристик автотракторных дизелей с волновым обменником давления: дис. канд. техн. наук: 05.05.03 / Манойло Владимир Максимович. – Х., 2001. – 276 с.
12. Извещение о некоторых испытаниях двигателя ВАЗ – 3411 с турбокомпрессором RHB5 фирмы INL (Япония), 1984. – 40 с.